DIE NATURWISSENSCHAFTEN

19. Jahrgang | 30. Oktober 1931 | Heft 44

James Clerk Maxwell
in seiner Bedeutung für die theoretische Physik in Deutschland[1].

Von MAX PLANCK, Berlin.

Die Bedeutung eines großen Forschers für die Kulturwelt spiegelt sich selbstverständlich vor allem in den wissenschaftlichen Ergebnissen, die seine Werke enthalten; denn diese sind die unmittelbarsten und wertvollsten Früchte seiner Lebensarbeit. Aber es gibt noch eine andere, mehr indirekte Art der Wirksamkeit, die eine bedeutende Persönlichkeit entfaltet, und die manchmal der vorher genannten fast ebenbürtig an die Seite tritt: das ist der anregende und fördernde Einfluß, den sie durch ihre Eigenart auf andere, mehr oder weniger kongeniale Zeitgenossen ausübt, und durch den sie mittelbar auch die Wissenschaft selber befruchtet. Im Gebiet der Geisteswissenschaften läßt sich freilich diese Unterscheidung zwischen direkter und indirekter Wirkung nicht immer streng durchführen, da doch die Beeinflussung der geistigen Umwelt oft schon einen Teil der eigentlichen Arbeit bildet. Um so deutlicher kann man auf dem Felde der Naturwissenschaften, wo Subjekt und Objekt der Forschung weit auseinander liegen, verfolgen, wie ein einzelner hervorragender Forscher nicht allein durch die Entdeckungen, die er selber macht, sondern auch durch die, zu welchen er andere anregt, seinen Namen in der Geschichte seiner Wissenschaft für alle Zeiten einträgt.

Gewiß muß ein jeder, der die physikalische Wissenschaft nicht als eine Beschreibung von einzelnen menschlichen Erlebnissen, sondern als die Erforschung der objektiven Natur auffaßt, zu der Schlußfolgerung gelangen, daß, selbst wenn die Länder der Erde in kultureller Beziehung gänzlich isoliert voneinander wären, die Entwicklung der Physik doch im großen und ganzen an allen Stellen den nämlichen Weg nehmen würde, daß es also der Wechselwirkung zwischen den Gelehrten der einzelnen Länder im Grunde gar nicht bedarf. Dafür spricht auch deutlich die Tatsache, daß große physikalische oder technische Entdeckungen häufig unabhängig an verschiedenen Orten gemacht worden sind, sobald die objektiven Vorbedingungen dafür geschaffen waren. Insofern sind die Naturforscher in den verschiedenen Ländern nicht aufeinander angewiesen und arbeiten auch dementsprechend unabhängig voneinander.

Aber es gibt in jeder Wissenschaft einzelne auserwählte Geister, gottbegnadete Naturen, die das von ihnen ausgehende Licht der Erkenntnis weit über die Grenzen ihres eigenen Landes strahlen lassen und dadurch die Forschungsarbeiten in der ganzen Welt auf direktem Wege vertiefen und beschleunigen. Zu ihnen gehört JAMES CLERK MAXWELL, dessen hundertjährigen Geburtstag wir heute feiern. Wenn man auch nicht daran zweifeln darf, daß alles, was er auf dem gesamten Gebiet der Physik geschaffen hat, auch ohne ihn früher oder später Gemeingut der Wissenschaft geworden wäre, so gebührt ihm eben doch nicht allein der Ruhm mancher ersten Entdeckung, sondern auch das Verdienst, seine Fachgenossen in allen Ländern der Erde gefördert und ihnen vielleicht manchen mühsamen Umweg und nutzlose Arbeit erspart zu haben.

Daß MAXWELL nicht gewissermaßen zufällig auf seine großen Gedanken geriet, sondern daß ihm dieselben naturnotwendig aus dem Reichtum seines Genius hervorquollen, beweist am besten der Umstand, daß er auf ganz verschiedenen Gebieten bahnbrechend und führend hervortrat; denn in allen Teilen der Physik war er Kenner und Meister.

Hauptsächlich sind es zwei entgegengesetzte Betrachtungsweisen, die sich neuerdings in den physikalischen Theorien herausgebildet haben, und die gerade seit MAXWELL sich immer schärfer voneinander abzuheben beginnen: die Physik der diskreten Korpuskeln und die Physik der Kontinua. Sie decken sich ungefähr, aber nicht ganz, mit der früheren Unterscheidung zwischen der Physik der Materie und der Physik des Äthers. Auf jedem dieser beiden Gebiete hat MAXWELL mit neuen fruchtbaren Ideen in den Entwicklungsgang der Wissenschaft fördernd eingegriffen. Wenn wir versuchen, deren Bedeutung für die Entwicklung der Physik in Deutschland zu schildern, so werden wir wohl am besten so verfahren, daß wir nach dem Einfluß fragen, den MAXWELL auf diejenigen seiner deutschen Fachgenossen ausgeübt hat, welche gleichzeitig mit ihm oder unmittelbar nach ihm in ihrer Wissenschaft als Führer vorangingen.

Beginnen wir mit der *Korpuskularphysik*. Dieselbe stammt schon aus dem Altertum, aber ihre Wiedergeburt und Modernisierung erlebte sie um die Mitte des vorigen Jahrhunderts mit der Aufstellung der kinetischen Gastheorie, die der Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalents auf dem Fuße folgte, und zwar bezeichnenderweise in verschiedenen Ländern und auch an verschiedenen Stellen eines Landes fast gleichzeitig durch verschiedene voneinander unabhängige Forscher, in England durch J. P. JOULE und J. J. WATERSTON, in Deutschland durch A. KRÖNIG und R. CLAUSIUS.

Auch MAXWELL begeisterte sich früh für diese neue, damals unerhört kühn erscheinende und von den Positivisten aller Gattungen als ein gefährlicher Irrweg scharf bekämpfte Hypothese, nach

[1] Im wesentlichen der Inhalt eines am 2. d. Mts. bei der MAXWELL-Jahrhundertfeier in Cambridge in englischer Sprache gehaltenen Vortrages. Der Vortrag ist abgedruckt in: JAMES CLERK MAXWELL. A Commemoration Volume 1831—1931, Cambridge, At the University Press, 1931.

der sowohl der Druck als auch die Wärme eines Gases zurückzuführen ist auf die schnellen Bewegungen der einzelnen unregelmäßig durcheinanderfliegenden Moleküle, die teils aneinander, teils gegen die Gefäßwände stoßen. Er fügte aber den Folgerungen, welche seine Vorgänger bezüglich des Zusammenhangs zwischen der mittleren Geschwindigkeit der Moleküle und dem Druck bzw. der spezifischen Wärme des Gases gezogen hatten, sogleich noch eine neuartige, wesentlich tiefer gehende, hinzu, indem er die Frage nach der Größe der Geschwindigkeit eines einzelnen beliebig herausgegriffenen Moleküls aufwarf und durch ihre Beantwortung den Grund zu einem ganz neuen Zweige der Physik, der statistischen Physik, legte. Denn es ist selbstverständlich, daß die genannte Frage nur durch ein Wahrscheinlichkeitsgesetz beantwortet werden kann, d. h. durch ein Gesetz, das angibt, welcher Bruchteil von den bei sehr zahlreichen Wiederholungen des nämlichen Versuchs herausgegriffenen Molekülen eine ganz bestimmte Geschwindigkeit besitzt. MAXWELL gelang es als erstem, ein solches Wahrscheinlichkeitsgesetz, das nach ihm benannte Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung, zu formulieren, und zwar erwies dasselbe sich als identisch mit dem bekannten GAUSSschen Fehlergesetz, wofern man annimmt, daß die drei räumlichen Komponenten des Geschwindigkeitsvektors voneinander unabhängig sind.

Die Wirkung dieser Entdeckung in Deutschland war etwas geteilt. KRÖNIG scheint sich mit dem Geschwindigkeitsverteilungsgesetz nicht näher beschäftigt zu haben, CLAUSIUS schenkte ihm zwar volle Beachtung, legte ihm aber doch offenbar keine tiefere Bedeutung bei, da er die Ansicht vertrat und zu begründen suchte, daß seine Gültigkeit sich auf den von MAXWELL betrachteten Fall beschränkt, daß die Moleküle sich wie elastische Kugeln verhalten.

Ganz anders LUDWIG BOLTZMANN, der sogleich mit voller Klarheit die fundamentale Stellung des MAXWELLschen Geschwindigkeitsverteilungsgesetzes in der kinetischen Gastheorie erkannte, und der in der Folge als der eigentliche Wegebereiter der MAXWELLschen Ideen in Deutschland aufgetreten ist, obgleich oder vielmehr gerade weil er zugleich auch die schärfste Kritik an ihnen geübt hat.

Zuerst verschärfte und verallgemeinerte BOLTZMANN den MAXWELLschen Beweis, der sich nur auf einatomige kugelförmige Moleküle bezog, auf mehratomige Moleküle, und zeigte weiter, namentlich durch die Aufstellung seines berühmt gewordenen sog. *H-Theorems*, daß die MAXWELLsche Verteilung der Geschwindigkeiten nicht nur stationär bleibt, wenn sie einmal besteht, sondern daß sie auch die einzige stationäre ist, da sie sich im Laufe der Zeit immer herausbilden muß, von welcher Anfangsverteilung man auch ausgehen mag. Im Anschluß daran führte BOLTZMANN den Nachweis, daß im stationären Zustand des Gases auf jeden Freiheitsgrad eines Moleküls ein entsprechender Betrag von Energie entfällt.

Eine Schwierigkeit, auf welche MAXWELL bei der Berechnung der spezifischen Wärme stieß und welche der kinetischen Gastheorie eine gewisse Verlegenheit zu bereiten drohte, konnte BOLTZMANN befriedigend überwinden. Sie betrifft das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck zu der bei konstantem Volumen, welche bei allen adiabatischen Vorgängen eine wesentliche Rolle spielt. Während nämlich für einatomige Gase, wie z. B. Quecksilberdampf, der unter der Annahme kugelförmiger Moleküle aus der Gastheorie berechnete Wert für das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen $1^2/_3$ vorzüglich übereinstimmt mit dem gemessenen Wert, zeigte sich bei den mehratomigen Gasen ein deutlicher Gegensatz zwischen Theorie und Erfahrung. Denn wenn man die Moleküle nicht als symmetrische Kugeln betrachtet, sondern ihnen drei verschiedene Trägheitsmomente zuschreibt, so erhält man als Verhältnis der spezifischen Wärmen $1^1/_3$, während für Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff $1^2/_5$ gemessen ist. BOLTZMANN zeigte den einfachen Ausweg aus dieser Schwierigkeit durch die Einführung der Annahme, daß die Moleküle dieser Gase nicht 3, sondern 2 verschiedene Trägheitsmomente besitzen, was gut übereinstimmt mit dem Umstand, daß dieselben zweiatomig sind, da die Verbindungslinie der beiden Atome sich unmittelbar als symmetrische Rotationsachse des Moleküls darbietet. Die weitere Frage freilich, wie sich denn derjenige Freiheitsgrad auswirkt, welcher dem Gegeneinanderschwingen der beiden Atome des Moleküls entspricht, konnte damals weder von BOLTZMANN, noch von MAXWELL befriedigend beantwortet werden, ihre Erledigung war einer späteren Epoche der Physik vorbehalten.

So sehen wir, wie die beiden Forscher, sich gegenseitig befruchtend, in edlem Wettbewerb miteinander an dem Ausbau der jugendlichen statistischen Mechanik arbeiteten, und es gewährt einen besonderen Reiz, zu verfolgen, wie sie, ein jeder auf dem seiner besonderen Denkart angepaßten Wege selbständig vorwärts schreitend und dabei doch den anderen beständig kontrollierend, ihre Ergebnisse immer weiter ausdehnen, um schließlich an dem nämlichen Ziele zusammenzutreffen. So besteht z. B. ein gewisser Unterschied der Betrachtungsweise darin, daß MAXWELL, um zu bestimmten statistischen Gesetzmäßigkeiten für ein kompliziert zusammengesetztes mechanisches Gebilde zu gelangen, das nämliche Gebilde in ungeheuer vielen in verschiedenen Zuständen befindlichen Exemplaren gleichzeitig betrachtet, während BOLTZMANN es vorzieht, ein einziges Gebilde in seinen vielgestaltigen Zustandsänderungen durch eine sehr lange Zeit hindurch zu verfolgen. Beide Betrachtungsweisen führen, konsequent durchgeführt, zu den nämlichen statistischen Gesetzen. Über den engen Zusammenhang der statistischen Mechanik mit der Thermodynamik waren

sich beide Forscher vollkommen klar. Insbesondere waren sie darin einig, daß der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, mechanisch betrachtet, ein Wahrscheinlichkeitsgesetz ist und infolgedessen für Einzelfälle auch Ausnahmen zuläßt.

Viel Sorge bereiteten der kinetischen Gastheorie die Gesetze für den zeitlichen Verlauf irreversibler Prozesse, wie Reibung, Diffusion, Wärmeleitung. Wenn auch manche gezogene Folgerung, wie die von MAXWELL gefundene Unabhängigkeit der Reibungskonstante vom Druck, mit der Erfahrung vorzüglich übereinstimmte, so brachten andererseits alle Versuche, den genauen Zahlenwert etwa des Reibungskoeffizienten festzustellen, die Theorie in eine recht unbehagliche Situation. Denn um die sehr verwickelten Rechnungen durchführen zu können, waren vereinfachende Annahmen nötig, wie z. B. die, daß die Geschwindigkeiten aller Moleküle gleich sind, oder die tiefer gehende Annahme, daß die Geschwindigkeitsverteilung in einer strömenden Gasschicht sich additiv zusammensetzt aus der Geschwindigkeitsverteilung im ruhenden Gase und der Geschwindigkeit der Strömung. Aber bei jeder dieser Annahmen, von denen keine genau zutrifft, traten innere Widersprüche auf, da unter den vernachlässigten Größen sich stets auch solche befanden, die von derselben Ordnung waren wie die beibehaltenen, so daß schließlich von sechs oder mehr Forschern auf diesem Gebiet jeder eine andere Zahl für das Verhältnis der Reibungskonstanten zur Wärmeleitungskonstanten fand, je nach dem Wege, den er bei der Berechnung eingeschlagen hatte.

BOLTZMANN zeigte den prinzipiellen Ausweg aus diesem Labyrinth, indem er für die Geschwindigkeitsverteilung in einer strömenden Gasschicht eine vollkommen exakte Formel aufstellte. Aber nun bestand die Schwierigkeit, daß es sich als unmöglich erwies, diese Gleichung befriedigend aufzulösen, wenigstens für den einfachsten Fall elastischer kugelförmiger Moleküle. Mit der ihm eigenen Konsequenz und Zähigkeit hat BOLTZMANN einen beträchtlichen, wohl unverhältnismäßig großen Teil seiner kostbaren Arbeitskraft darangesetzt, auf sukzessivem Wege, durch Aufstellung von Reihenentwicklungen, das Problem zu meistern. Von den mühsamen und langwierigen dabei angestellten Rechnungen geben die mit schier endlosen Formeln und Zahlen bedeckten Seiten seiner drei Abhandlungen „zur Theorie der Gasreibung" eine eindrucksvolle Vorstellung.

MAXWELL verfuhr anders. Statt sich wie BOLTZMANN auf das widerhaarige Problem der rechnerischen Auflösung der Formeln für den Fall elastischer kugelförmiger Moleküle zu versteifen, änderte er die ganze Fragestellung, indem er an die Stelle der elastischen Moleküle andere Moleküle mit bequemeren Eigenschaften setzte. Die Möglichkeit zu diesem Kunstgriff gab ihm die Überlegung, daß die Eigenschaften des Druckes, der Reibung usw. eines Gases weitgehend unabhängig sein müssen von dem speziellen Gesetz, das für den Zusammenstoß zweier Moleküle gilt, wofern nur beim Stoß die Erhaltungssätze von Energie und Impuls gewahrt bleiben, da doch der Stoß nur eine verhältnismäßig sehr kurze Zeit in Anspruch nimmt. Im Falle harter elastischer Körper ist der Stoß ein vollkommen unstetiger Vorgang; denn die beiden stoßenden Moleküle behalten bis zum Augenblick des Stoßes ihre Geschwindigkeit nach Größe und Richtung unveränderlich bei, bis sie durch den Stoß plötzlich einen bestimmten Sprung erleiden. Statt dessen kann man aber, wenn es nur auf das Gesamtresultat ankommt, ebensogut den Stoß als einen stetigen, wenn auch schnellen Übergang von der Anfangsgeschwindigkeit zu der Endgeschwindigkeit auffassen, indem man zwischen den Molekülen eine gewisse abstoßende Kraft als wirksam voraussetzt, deren Größe einer nicht zu niedrigen Potenz der Entfernung umgekehrt proportional ist. Dann werden nämlich die Moleküle, so lange sie einigermaßen weit voneinander entfernt sind, sich nahezu unabhängig voneinander, also mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, und nur so lange sie einander sehr nahe sind, werden sie starke Änderungen ihrer Geschwindigkeit erleiden, die im Resultat ähnlich wirken wie ein Zusammenstoß.

Unter allen Potenzen der Entfernung für das Kraftgesetz erwies sich nun die 5. Potenz, für welche der Satz gilt, daß die kleinste Entfernung, in welche zwei Moleküle beim zentralen Zusammenstoß gelangen, der Quadratwurzel ihrer relativen Geschwindigkeit vor dem Stoß umgekehrt proportional ist, deshalb als besonders bequem, weil bei der Annahme des entsprechenden Kraftgesetzes die relative Geschwindigkeit der Moleküle aus den Formeln für die Reibung ganz herausfällt und man daher der allgemeinen Formel für die Geschwindigkeitsverteilung in einer strömenden Gasschicht gar nicht bedarf. Daher führte MAXWELL jenes Kraftgesetz ohne weiteres in seine Theorie ein, d. h. er postulierte zwischen je zwei Molekülen eine Abstoßungskraft, umgekehrt proportional der 5. Potenz ihrer Entfernung, und gelangte dadurch zu einer verhältnismäßig einfachen exakten Lösung des Reibungsproblems.

Auf BOLTZMANN machte diese Leistung MAXWELLs auch nach der Form ihrer Darstellung einen solchen Eindruck, daß er ihr geradezu den Rang eines vollendeten Kunstwerkes zuschrieb. In schwungvollen Worten verglich er den Inhalt der MAXWELLschen Abhandlung mit einem gewaltigen musikalischen Drama, dessen Verlauf er in folgender, nicht minder für ihn selber als für MAXWELL charakteristischen Weise schildert: „Zuerst entwickeln sich majestätisch die Variationen der Geschwindigkeiten, dann setzen von der einen Seite die Zustandsgleichungen, von der andern die Gleichungen der Zentralbewegung ein, immer höher wogt das Chaos der Formeln; plötzlich ertönen die vier Worte: put $n = 5$. Der böse Dämon V (das ist die relative Geschwindigkeit zweier Moleküle) verschwindet, wie in der Musik eine wilde, bisher

alles unterwühlende Figur der Bässe plötzlich verstummt; wie mit einem Zauberschlage ordnet sich, was früher unbezwingbar erschien. Da ist keine Zeit zu sagen, warum diese oder jene Substitution gemacht wird; wer das nicht fühlt, lege das Buch weg, MAXWELL ist kein Programmusiker, der über die Noten deren Erklärung setzen muß. Gefügig speien die Formeln nun Resultat auf Resultat aus, bis überraschend als Schlußeffekt noch das Wärmegleichgewicht eines schweren Gases gewonnen wird und der Vorhang sinkt." —

Auch wir wollen jetzt diesen Vorhang fallen lassen und uns nunmehr dem andern Gebiet der Physik zuwenden, auf welchem MAXWELLS Forschergeist noch ungleich größere Triumphe aufzuweisen hat: der Physik des Äthers oder der *Elektrodynamik*.

Wenn in der kinetischen Gastheorie MAXWELL zwar auch als Führer auftritt, aber doch diese Rolle mit mehreren andern Forschern teilt, offenbart sich auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre sein Genie in voller einsamer Größe. Denn hier war speziell ihm nach mehrjähriger stiller Forschungsarbeit ein Erfolg beschieden, den wir zu den größten Wundertaten menschlichen Geistes rechnen müssen, da es ihm gelang, durch reines Denken der Natur Geheimnisse abzulocken, die zum Teil erst ein volles Menschenalter später durch scharfsinnige und mühsame Experimente ans Licht gezogen wurden. Daß eine solche Leistung überhaupt möglich war, würde völlig unbegreiflich erscheinen, wenn man nicht annehmen wollte, daß zwischen den Gesetzen der Natur und denen des Geistes gewisse sehr enge Beziehungen bestehen.

Freilich dürfen wir nicht vergessen, daß MAXWELL seine Theorie der Elektrodynamik nicht beliebig in die Luft gebaut hat. Denn aus nichts wird nichts. Er stützt sich vielmehr auf das Werk MICHAEL FARADAYS, der durch seine Experimente ihm die feste Grundlage für seine Gedankengänge geschaffen hat, und dessen Gedächtnisfeier mit schöner Harmonie in unser heutiges Fest ergänzend nachklingt. Aber MAXWELL ist mit kühner Phantasie und mathematischem Scharfblick über FARADAY hinausgegangen, er hat dessen Ideen zugleich präzisiert und erweitert, und dadurch eine Theorie gestaltet, die es nicht nur mit den älteren bewährten Theorien der Elektrizität und des Magnetismus aufnehmen konnte, sondern durch ihre Erfolge dieselben noch weit übertroffen hat. Denn das Kriterium einer leistungsfähigen Theorie, daß sie auch von solchen Vorgängen Rechenschaft gibt, für welche sie anfänglich gar nicht aufgestellt war, hat sich wohl bei keiner Theorie so glänzend erfüllt gezeigt, als eben bei der MAXWELLschen. Weder FARADAY noch MAXWELL haben wohl bei ihren Überlegungen über die Grundgesetze der Elektrodynamik ursprünglich an die Optik gedacht. Und doch ist das ganze Gebiet der Optik, welches allen Erklärungsversuchen seitens der Mechanik mehr als ein Jahrhundert hindurch einen hartnäckigen Widerstand entgegengesetzt hatte, mit einem Schlage restlos der MAXWELLschen Elektrodynamik eingeordnet worden, so daß seitdem jeder optische Vorgang unmittelbar als elektrodynamischer Vorgang behandelt werden kann — zweifellos einer der größten Triumphe des menschlichen Erkenntnistriebes.

Freilich bedurfte die MAXWELLsche Theorie bei ihrer Eigenartigkeit zunächst einer etwas mühseligen Entwicklung. Denn was ihr Verständnis ungemein erschwerte und daher ihre überzeugende Kraft von vornherein stark einschränkte, war die Unmöglichkeit, für ihre Formeln durch eine geeignete Verbindung mit mechanischen Vorstellungen eine einfache und allgemeine Veranschaulichung ausfindig zu machen.

In Deutschland hat diese Schwierigkeit ganz besonders hemmend gewirkt. Hier vollzog sich nämlich der Ausbau der Elektrodynamik um die Mitte des vorigen Jahrhunderts ausschließlich im Zeichen der Potentialtheorie, welche namentlich von C. F. GAUSS aus dem NEWTONschen Gesetz der Fernewirkung für statische elektrische und magnetische Felder ausgebildet und zu hoher mathematischer Vollkommenheit gebracht worden war. Die für dynamische Vorgänge anzubringende Verallgemeinerung suchte man daher in einer Erweiterung des NEWTONschen Gravitationsgesetzes, indem man die Größe der Anziehungskraft außer von der Lage auch von der Geschwindigkeit oder von der Beschleunigung der aufeinanderwirkenden Massenzentren abhängig annahm. Die Behauptung FARADAYS und MAXWELLS, daß unvermittelte Fernewirkungen gar nicht existieren und daß das Kraftfeld eine selbständige physikalische Existenz besitzt, war dieser ganzen Gedankenrichtung so fremd, daß die MAXWELLsche Theorie in Deutschland überhaupt keinen Boden fand und kaum beachtet wurde. Die elektromagnetische Lichttheorie betrachtete man im besten Falle als ein interessantes Kuriosum.

Nur einige wenige Physiker fühlten sich anfangs veranlaßt, ihr ernstlich näherzutreten. Zu ihnen zählt LUDWIG BOLTZMANN, der namentlich den von MAXWELL behaupteten Zusammenhang zwischen dem Brechungsindex und der Dielektrizitätskonstanten studierte und durch äußerst sorgfältig angestellte Versuche an verschiedenen Substanzen, namentlich an Gasen, vollkommen bestätigte. Weniger erfolgreich mußten naturgemäß die angestrengten Versuche verlaufen, die er machte, um die MAXWELLschen elektrodynamischen Gleichungen durch mechanische Modelle dem Verständnis näherzubringen.

H. v. HELMHOLTZ, der die MAXWELLsche Theorie wegen ihrer besonderen formalen Einfachheit schätzte, nahm einen vermittelnden Standpunkt ein. Durch eingehende Untersuchungen gelang es ihm, für die Wechselwirkungen von ungeschlossenen elektrischen Strömen ein allgemeines Gesetz aufzustellen, welches sowohl die verschiedenen Fernewirkungstheorien als auch die entsprechende MAXWELLsche Formel als Spezialfälle enthält. Über

den grundsätzlichen Gegensatz zwischen Fernwirkung und Nahwirkung vermag freilich diese Betrachtungsweise nicht hinwegzuhelfen.

Die endgültige Entscheidung in dem Widerstreit der Theorien zugunsten der MAXWELLschen Theorie in Deutschland und in der ganzen Welt zu bringen, war erst dem bedeutendsten Schüler von HELMHOLTZ, HEINRICH HERTZ, vorbehalten. Es ist bemerkenswert, daß HERTZ schon mehrere Jahre vor der Anstellung seiner epochemachenden Versuche durch theoretische Betrachtungen zu der entschiedenen Überzeugung geführt wurde, daß vom Standpunkt der damals bekannten physikalischen Tatsachen beurteilt, die MAXWELLsche Theorie den Theorien der Fernewirkung prinzipiell überlegen sei. Da sein Gedankengang nicht überall die ihm gebührende Beachtung gefunden zu haben scheint, so sei es mir gestattet, hier kurz auf ihn einzugehen.

Wenn es nur eine einzige Art von elektrischer Kraft gibt, wenn also die Kraft, mit der eine geriebene Ebonitstange ein elektrisch geladenes Holundermarkkügelchen anzieht oder abstößt, die nämliche ist, wie die Kraft, mit der ein bewegter oder sonst veränderter Magnet in einem Leiter einen elektrischen Strom induziert, so muß derselbe Magnet auch ein geladenes Holundermarkkügelchen in Bewegung setzen können; dann muß auch umgekehrt nach dem mechanischen Prinzip von Wirkung und Gegenwirkung ein elektrostatisch geladener Körper auf einen bewegten Magneten ponderomotorisch wirken, und dann muß schließlich ein bewegter Magnet auf einen anderen bewegten Magneten, abgesehen von der gewöhnlichen magnetischen Wirkung, ponderomotorisch wirken mit einer elektrischen Kraft, die von der relativen Bewegung der Magnete abhängt. Nun kennt aber die auf Fernewirkungen aufgebaute Elektrodynamik nur solche ponderomotorische Wirkungen zwischen Magneten, die von den augenblicklichen Magnetismen abhängen, nicht aber von deren zeitlichen Veränderungen; und es ergibt sich also daraus, daß diese Elektrodynamik, von dem eingenommenen Standpunkt aus betrachtet, unvollständig ist.

Die Hinzufügung des betreffenden Gliedes ergibt eine bestimmte Korrektion, die allerdings nur sehr klein ist, da sie das Quadrat der sog. kritischen Geschwindigkeit im Nenner enthält. Dabei kann man aber nicht stehenbleiben. Aus einer Korrektion der ponderomotorischen Wirkungen ergibt sich nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie mit Notwendigkeit eine Korrektion der Induktionswirkungen. Da aber die induzierenden Kräfte mit den ponderomotorischen wesensgleich sein sollen, so folgt wieder eine neue Korrektion der ponderomotorischen Wirkungen, und so geht der Schluß ins Unendliche weiter. Bringt man jedesmal die betreffende Korrektion wirklich an, so erhält man, wie ersichtlich, sowohl für die ponderomotorischen als auch für die Induktionswirkungen elektrischer wie magnetischer Art unendliche Reihen, die nach absteigenden geraden Potenzen der kritischen Geschwindigkeit fortschreiten und daher im allgemeinen konvergieren. Das Merkwürdige nun ist, daß diese Reihen den von MAXWELL für die elektromagnetischen Störungen aufgestellten Differentialgleichungen, nach welchen sich diese Störungen mit der kritischen Geschwindigkeit fortpflanzen, genau Genüge leisten.

Diese eigentümliche Ableitung der MAXWELLschen Theorie aus der Annahme einer unvermittelten Fernewirkung betrachtete HERTZ natürlich nicht als einen Beweis der Richtigkeit dieser Theorie, weil aus einer unsicheren Voraussetzung niemals ein sicheres Resultat abgeleitet werden kann, wohl aber als eine hinreichende Begründung für den folgenden Schluß: „Wenn nur die Wahl vorliegt zwischen dem gewöhnlichen System und dem MAXWELLschen, so gebührt dem letzteren unbedingt der Vorzug."

Durch ein eigentümliches Zusammentreffen empfing fast genau gleichzeitig mit dem Erscheinen dieser Arbeit von HERTZ die MAXWELLsche Lichttheorie in Deutschland einen neuen kräftigen Impuls durch die berühmt gewordene kleine Abhandlung von BOLTZMANN über die Temperaturabhängigkeit der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers, in welcher das von J. STEFAN empirisch gefundene Gesetz mittels des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik aus dem MAXWELLschen Strahlungsdruck abgeleitet wurde.

So häuften sich doch die Anzeichen für die universelle Bedeutung der MAXWELLschen Ideen von verschiedenen Seiten her allmählich immer stärker, bis dann die zielbewußt fortgesetzten Experimente von HEINRICH HERTZ mit sehr schnellen elektrischen Schwingungen gekrönt wurden durch einen beispiellosen Erfolg: durch die Realisierung elektrischer Wellen von der Länge einiger Zentimeter. Durch diese in der ganzen physikalischen Welt das größte Aufsehen erregende Entdeckung waren die Gedanken MAXWELLS in die Tat umgesetzt und zugleich eine neue Epoche der experimentellen und theoretischen Physik eingeleitet.

Die Bedeutung der HERTZschen Versuche für die MAXWELLsche Theorie erscheint nur noch gewichtiger, wenn man bedenkt, daß HERTZ von vornherein durchaus nicht etwa darauf ausging, die MAXWELLsche Theorie zu verifizieren. Wie wenig er von theoretischer Seite her irgendwie voreingenommen war, erhellt am besten aus der Tatsache, daß er eine Zeitlang aus seinen Versuchen, im Gegensatz zur MAXWELLschen Theorie, einen Unterschied in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen festgestellt zu haben glaubte, je nachdem sie in freier Luft oder längs einem Draht fortschreiten, und erst später erkannte, daß der beobachtete Unterschied nur durch störende Einflüsse umgebender leitender Körper vorgetäuscht worden war.

Von nun ab war der Sieg der MAXWELLschen Theorie entschieden, und als die nächste Aufgabe der Forschung erschien ihr weiterer Ausbau nach

möglichst vielen Richtungen, namentlich die Herstellung und Untersuchung von Wellen, die nach ihrer Länge in das Zwischengebiet zwischen den elektrischen und den optischen Wellen fallen. Unter den deutschen Physikern, welche sich um diese Aufgabe verdient gemacht haben, ist in erster Linie HEINRICH RUBENS zu nennen, der zugleich auch in Gemeinschaft mit ERNST HAGEN den wichtigen Nachweis führte, daß die gemessene Reflexion des Lichtes an Metallen, deren Erklärung MAXWELL selber ernstliche Schwierigkeiten bereitet hatte, sich bis in alle Einzelheiten der MAXWELLschen Theorie fügt, sobald man nur Licht von größerer Wellenlänge verwendet. Dadurch ist aus einem Sorgenkind der MAXWELLschen Theorie eines ihrer stolzesten Sprößlinge geworden.

Freilich bleibt noch als ein dunkler Punkt die Frage der Reflexion kurzwelligen Lichtes an Metallen übrig. Hier treffen wir in der Tat auf die Grenze, über welche die MAXWELLschen Gleichungen in ihrer ursprünglichen, der Annahme einer kontinuierlich im Raume verteilten Materie entsprechenden Fassung, nicht mehr hinausreichen, und es kündigt sich die Notwendigkeit der Einführung atomistischer Vorstellungen an. Je mehr in der Folgezeit die Verfeinerung der Messungsmethoden fortschritt, um so deutlicher wurde offenbar, daß es mit der Atomistik der Materie allein nicht getan ist, daß auch die Energie in gewissem Sinn eine atomistische Struktur besitzt, ja daß die in der Physik bis dahin stets als selbstverständlich eingeführte und auch bei unseren jetzigen Betrachtungen der Einteilung des Inhalts zugrunde gelegte Unterscheidung zwischen korpuskularen und undulatorischen Vorgängen prinzipiell gar nicht durchführbar ist, sondern nur als ein Grenzfall zugelassen werden darf. Denn wie einerseits in einer homogenen Welle die Energie tatsächlich in diskreten Partikeln auftritt, so trägt auf der andern Seite der Zusammenstoß zweier Moleküle immer zugleich auch die Züge einer Interferenzerscheinung zweier Wellengruppen.

MAXWELL hat diese umwälzende Entwicklung nicht mehr erlebt, seine Aufgabe konnte es nur sein, die klassische Theorie auszubauen und zu vollenden, und in der Erfüllung dieser Mission hat er das denkbar Höchste geleistet. So steht sein Name weithin glänzend an der Ausgangspforte der klassischen Physik, und wir dürfen von ihm sagen: Nach seiner Geburt gehört J. C. MAXWELL zu Edinburgh, nach seiner Persönlichkeit gehört er zu Cambridge, nach seinen Werken gehört er der ganzen Welt.